



基于量子理论，费米帮助建立了一个理解物质的新框架。这个框架在两个关键方面完善和改进了传统的原子论。首先，物质的基本组分可归属于很少的几类，且给定种类（如电子）中所有的成员都是严格全同的和确实不可分辨的。这种深奥的全同性可通过量子统计现象用实验展示，并可用自由量子场论的原理来解释。第二，一个种类中成员可以变异为其他种类的成员。这种变异性可被理解为显现相互作用量子场论。费米通过他在量子场论和量子统计方面的工作，为建立这种新观点的理论基础做出了贡献，并通过他关于 β 衰变、核嬗变以及早期的强相互作用理论的工作，促进了这种新观点富有成效的应用和实验验证。

费米及物质的解释

维尔切克 著

丁亦兵 乔从丰 李学潜 沈彭年 任德龙 译

在恩里克·费米（Enrico Fermi）诞辰 100 周年之际，我有幸回到我的母校去表达一份敬意。费米永远是我心目中的一位英雄，也是我的科学“曾祖父”（按照费米→邱(Chew)→格罗斯(Gross)→威尔切克排列)。在演讲的准备过程中，浏览他的论文也是一种乐趣和启发。

我被要求就“费米对现代物理的贡献”演讲半个小时。当然，演讲的内容需要严格的挑选。在我后面的几位讲演者将会讨论费米作为教师和科学界知名人士的杰出成就，显然我的工作将集中于他对科学文献的直接贡献。除非去分类编目，我的任何作法都将遗漏太多的材料。但分类是可笑的，也是冗长乏味的，因为带有费米同事们重要评注的费米文集很容易得到。我决定要做的是，找到并且遵循一个可以把费米最重要的工作联系在一起的统一的思路。尽管费米的论文内容异常广泛，并且总是集中于一些具体问题，但这样的思路不难理出。对那些我认为是 20 世纪物理学最重要的成就：即一个基于一些非常不直观的概念，但已整理到一些精确且可使用的方程中的、实际上精确的、十分完整的物质理论，费米是一位多产的撰稿人。

一、改变了的原子论

从伽利略和牛顿时代，物理学的目标——很少被清楚地表述，但在实践中是默认的——是导出一些动力学方程，这样给定一个物质体系在某时刻的组态后，其他时刻的组态就能被预言。基于牛顿天体力学的太阳系的描述将此目标变成了现实。这种

描述出色地解释了行星运动的开普勒（Kepler）定律、潮汐、岁差和很多其他现象的原因，但对诸如行星的个数和它们的卫星、它们的相对大小或它们轨道的尺度等都没有给出推理的预言。实际上我们现在知道别的一些恒星支持迥然不同类型的行星系统。与之相似，在电学、磁学、光学等诸方面的 18 和 19 世纪的伟大发现，综合成为电磁学的麦克斯韦动力学方程，对给定的电荷、电流及电场和磁场的分布行为提供了一个丰富的描述，但没有解释为什么应该存在一些特定的可以重复的物质形式。

更具体地，经典物理中没有什么东西能解释存在具有一定大小和特性的基本组元。然而物理世界最基本的事实之一就是，物质由很少的几种基本组元（例如电子、夸克、光子、胶子）构成，每种组元都有大量的全同拷贝。由于每个原子都会有自己稀奇的性质，难道就不能存在有规可循的化学吗？相反，我们在自然界中发现了这些性质的精确一致性，甚至跨越宇宙尺度。遥远星系恒星大气中的原子发射出的谱线的模式与我们在地球实验室中观测到的一致。

几个世纪来，原子论某些形式的证据已被定性和半定量的确认。卢克莱修（Lucretius）对于古代原子论给出了诗一般的描述，牛顿在他著名的《31 问》中表示赞同，写道：

我认为似乎这是很可能的：上帝最初用实心的、有质量的、坚硬的、不可穿透的和可运动的粒子构造物质，这些物质具有那样的尺度和外形并具有那

样的一些其他性质，与空间如此相称，以致最有利于达到上帝通过构造它们所要实现的终极目标；并且这些原始的固态的粒子与任何由它们复合成的可渗透的物体相比是无比坚硬的，甚至坚硬到绝不可能磨损和破碎；没有什么普通力量能分割上帝自己在首次创造中造出的粒子。

在 19 世纪，道尔顿 (Dalton) 通过认定定比定律，使原子论成为化学科学的基础。克劳修斯 (Clausius)、麦克斯韦 (Maxwell) 和玻尔兹曼 (Boltzmann) 用它对气体行为构建了成功的定量理论。但在这些发展中，原子本身的性质不是推导出来的，而只是假设，并且他们的理论并没有更多地超出牛顿的表述。特别是，两个基本问题渴求解决。

问题 1，为什么物质由大量的仅有的几类粒子构成？为什么给定种类的所有粒子严格地表现出相同的性质？

粒子的不可分辨性对所有现代物理科学来说是如此熟悉和如此基本，以致我们认为它是理所当然的。然而，它绝非显而易见。例如，它直接与莱布尼兹 (Leibniz) 形而上学的支柱之一，他的“不可辨元的同一性原理”相矛盾，根据这个原理，两个物体不会仅在数量上不同，还会经常展现出一些可分辨的特征。麦克斯韦认为不同分子的相似性是如此地引人注目，以致他在《大不列颠百科全书》的最后一部分列入原子的词条——大大超过一千字——以讨论它。他总结道：

因此分子的形成是一个事件，它不属于我们所生活的自然界的层次……它一定不是和地球或太阳系的形成的时期有关，而是与自然界存在层次的建立时期有关……

问题 2，为什么存在不同种类的粒子？为什么它们会以它们自有的比例存在？

正如我们刚刚看到的，牛顿和麦克斯韦都考虑了这个问题，但它们认为其答案超出了物理学的范围。

到 20 世纪末，物理学在这些问题上有了决定性进展。从一个“怎样”的科学扩展成一个“什么”的科学，该种科学为“为什么”提供了一种深刻得多的理解。一个全新的物质模型已经构建。基本组元已被梳理清楚，它们行为的方程已被精确地定义。但反常的是，我们的改变了的原子论的组元远比经典物理所设想的原子更具可再生性和性质的易变

性。犹如我将讨论的，费米是这一构建的主要缔造者，对许多层面的设计都做出了贡献。

二、全同的和不可分辨的

基于经典物理的观点，电子（或其他基本组元）的不可分辨性既是不必要的也是令人惊奇的。假如电子是近似地但并不完全精确地全同，例如，假如它们的质量在十亿分之几的范围内变化的话，那么根据经典物理的定律，不同样本电子的行为会很接近但不会是完全相同的。由于是连续变化的，我们就不可能排除这样的可能性，即较现有精度更高的未来的测量或许会发现电子间的微小差别。确实，预期将产生差别似乎是合理的，因为电子经过漫长的一生，最终会基于各自的历史发生磨损或弯折。

非常精确且比纯粹形似更为深刻的、相同粒子相似性的第一个证据来自于卓西亚·威拉德·吉布斯 (Josiah Willard Gibbs)，在其关于统计力学基础的工作中给出的一个简单而深刻的看法。它被称为“吉布斯佯谬”，其内容如下：假如我们有一个分隔成两个相等大小空间 A 和 B 的盒子，二者都充满着温度相同、密度相同的氢气。进一步假设有一个开关将这两个空间隔开，如果打开开关让气体达到平衡，想想会发生什么情况。原来禁闭在 A（或 B）中的分子可能会出现在 A+B 中的任何地方。这样，因为分子分布似乎存在更多不同的可能性，量度可能微观状态数的气体的熵看来将会增加。另一方面，基于日常经验，人们可能会有相反的直觉，即处于平衡态的气体的性质完全由其体积、温度和密度来表征。如果这个直觉是正确的，那么在我们的这个想象实验中，打开开关的动作没有使气体的状态产生任何变化，当然它也就没产生任何熵。事实上这个结果正是人们在实际实验中所发现的。

关于吉布斯佯谬的实验判定有着深刻含义。如果我们能跟踪每一个分子，我们肯定会有额外的熵，即所谓的混合熵。确实，当不同种类的气体比如说氢和氦混合时，熵产生了。因为（表观上）类似气体的混合熵从没有被观测到，所以甚至在原则上也没有任何办法表明它们的分子分开了。因此我们不可能作这样一种严格的陈述：“分子 1 在 A 中，分子 2 在 A 中，……，分子 n 在 A 中”，而只能给出一种弱得多的说法：“有 n 个分子在 A 中”。在这种精确意义上，氢分子不是仅仅相似的，甚至也不是仅仅完全相同的，而是超越它们，是不可分辨的。

经典统计力学的一个不同的但又相关的困难，即无法解释能斯特（Nernst）定理，是费米的状态计数概念的原动力。而这个从实验数据中抽取出来的能斯特定理意味着当绝对温度为零时，物质的熵会消失。像吉布斯佯谬一样，它表明存在的状态远少于经典上出现的状态，特别是没有混合熵。所以费米建议将泡利不相容原理从它的光谱学起源推广为一个普遍原理，不仅对电子，而且作为一般地描写物质的候选者：

所以下面我们将假设，在我们的气体中最多只存在一个具有给定量子数的分子：作为量子数我们不仅必须考虑决定分子内部运动的那些量子数，而且还要考虑决定它的平移运动的量子数。

令人称奇，或许独具特色的是费米在计算他的理想气体的性质时，使用了一些经过检验的旧量子论方法。他把他的分子置于一个假想的浅谐振子势阱中，确定借助玻尔-索末菲（Bohr-Sommerfeld）量子化规则得到的单粒子能级，并且将这些能级的每一种粒子分布指定为系统的一个状态。（当然，他也没有忘记提到这些结果不应该依赖于这个过程细节。）通过精巧的组合，理想费米-狄拉克气体的所有标准结果就能轻易地被推导出来。

确实，在几段导引性陈述后，论文变成了一系列仅被极短的一般形式的语句，“现在让我们计算……”所打断的方程。所以下面的插话，尽管简短，但值得引起注意：

在绝对零度，我们的气体分子自身排列成一种壳层结构，与一个多电子原子中电子的排列有一些类似。

我们在这里可以看到托马斯（Thomas）-费米原子模型的萌芽，该模型直接来源于费米对量子气体的处理，并对物质性质给出了绝妙的见解。当然，谐振子势阱中费米子的一般方案也是原子核壳模型的出发点——下面有更多的介绍。

始于索末菲和贝特（Bethe），成功地改写费米理想气体理论去描写金属中电子，以及许多其他应用，都证实了他的方法的有效性。

三、量子场要素 I：自由场

如我已经强调的，费米的状态计数法逻辑上需要基本的粒子完全的不可分辨性。然而他没有解释这个事实，所以这个方法的成功只会使我们在问题 1 中提出的基本问题更为尖锐。要深刻理解这个问

题需要从另一种不同的角度出发的考虑。它来源于量子力学和狭义相对论的综合。

场的概念主导物理学始于法拉第（Faraday）在 19 世纪中叶的工作。物理学早期的牛顿方程式根据原子粒子之间的力来表达基本定律，场观念相对于这种的优势当我们考虑环境时出现了，环境对牛顿（或就这件事而言，对法拉第）来说是未知的，但在狭义相对论中却是根本的，在那里，物理影响不会比一个有限的极限速度传播得更快。因为这意味着在给定时刻施加于一给定粒子上的力不能从该时刻其他粒子的位置推导出来，而必须以复杂的方法从它们先前的位置推导出来。当然，法拉第的直觉，即电磁学基本定律可用充满空间和时间的场最简单地表达出来，被麦克斯韦的数学理论出色地证实。

定域概念对于科学实践是基本的，以此粗略的形式，人们可在不涉及远处物体的情况下预言邻近物体的行为。有实际经验的实验者——如果不是占星家——以非常成功的经历为基础，自信地预期，在合理（一般而言，非常适度）的小心将实验孤立进行之后，他们会得到可重复的结果。

场和定域观念深刻和古老的历史根源不能提供任何保证将这些观念外推到远在它们经验起源之外的亚原子及量子领域时，它们仍然是有价值的和有效的。这种外推必须由它的成效来评价。非常显然，相对论量子场论的最早的一些结果以它鲜明的形式包括费米的量子态计数，提供了对我们的问题 1 的回答。

在量子场论中，粒子不是首要的实体。相对性和定域性要求场而不是粒子是首要的实体。根据量子场论，这些场的激发以不连续的团块形式出现。这些团块就是我们所确认的粒子。以这种方式，粒子是从场导出的。确实，我们称之为粒子的东西，不过是量子场低能激发呈现出来的形式。所以所有的电子都精确地相同，因为它们都是同一基础事物（Ur-stuff），即电子场的激发。同一逻辑当然适用于光子或夸克，甚至诸如原子核、原子或分子这类复合物体。

考虑到一种基本粒子的不可分辨性，包括它们的相互作用在相互交换下的完全不变性，量子力学的普遍原理告诉我们，形成交换对称群任意表示的解在时间上保持这种性质。但它们不限制哪个表示被实现。量子场论不仅解释了不可分辨粒子的存在

和它们的相互作用在交换下的不变性，也限制了解的对称性。存在两种可能性，玻色子或费米子。对玻色子来说，只有恒等表示是物理的（对称的波函数）；对费米子来说，只有一维奇表示是物理的（反对称的波函数）。量子场论还有个自旋-统计定理，根据这个定理具有整数自旋的粒子是玻色子，而具有半奇数自旋的粒子是费米子。当然，费米子遵从费米的状态计数程序。例子是电子、质子、中子、夸克以及其他带电轻子和中微子。

在这里不太适宜评述证明了前一段断言的量子场论基本原理。但一个简短的启发性讨论是恰当的。

在经典物理中，粒子有确定的轨迹，而且对于我们能够追踪它们的径迹所具有的精度没有任何限制。于是原则上我们总可以记录谁是谁。所以经典物理与严格的不可分辨粒子的观念是不相容的，它回答了吉布斯佯谬错误的一面。

在不可分辨粒子的量子理论中，情形完全不同。粒子的可能位置由波（即它们的波函数）描述。波可以重叠和模糊不清。与此相关，根据海森伯的不确定原理，我们可以追踪粒子径迹所能达到的精度存在一个限制。所以当我们计算使一个物理过程发生的量子力学振幅时，我们必须把来自于所有可能出现方式的贡献求和。因此为了计算如下一个过程的几率幅，即一个包含有两个已知种类的不可分辨粒子——称之为量子——在 t_i 时刻位于 X_1 和 X_2 的态，将演化为在 t_f 时刻两个量子位于 X_3 和 X_4 的态，我们必须将这两个量子在中间时刻所有可能轨道的贡献求和。这些轨道分为两个不同的种类。其中之一，初始时刻在 X_1 处的量子运动到 X_3 而初始时刻在 X_2 处的量子运动到 X_4 。而另一类，初始时刻在 X_1 处的量子运动到 X_4 而初始时刻在 X_2 处的量子运动到 X_3 。因为（依据假设）这两个量子是不可分辨的，所以对这两类，末态都是相同的。因此，根据量子力学的一般原理，我们必须将这两类的几率幅相加。我们说对这个过程存在“直接的”和“交换的”贡献。类似地，如果我们有二个以上的量子，就必须把包括原始粒子任意置换的贡献都加起来。

因为轨道分为不同种类，我们也可设想将带有相对因子的几率幅加起来。然而数学上的自洽性严格地限制了我们的自由。我们必须要求当我们对中间时间的态求和时，几率幅相乘的法则与总几率幅的法则自洽。因为交换两次的最终结果与根本没有

交换是相同的，所以我们必须这样来指定因子，即直接 \times 直接=交换 \times 交换，而唯一的自洽可能性是：直接/交换= ± 1 。这分别对应于玻色子（+），和费米子（-）。符号的这种选择决定了直接贡献和交换贡献之间的干涉项对几率幅平方（译者注：应为几率幅模的平方），亦即总过程的几率的贡献。这种选择对计算甚至是短寿命的、禁闭的、难以描述的粒子如夸克和胶子的基本反应都是至关重要的，这些粒子的平衡态统计力学尚属争论未决的问题。

四、最引人注目的工作： β 衰变

前面的量子场论的推论，源于它的基本“运动学”结构，不依赖于任何具体的动力学方程。它们证实了费米的状态计数法，并把它深深扎根于一个更能充分理解的框架中。但费米本人对量子场论的主要贡献出现在下一阶段，在理解它的动力学含义方面。

费米通过对许多实例的处理以及用于教学实践，理解了量子电动力学。在这样做的过程中，他将狄拉克原始的、抽象的理论表述融入他自己的更具体的思维方式中。他的评论文章是一篇杰作，甚至今天读起来仍富于启发性和令人精神振奋。它开始写道：

狄拉克的辐射理论基于一个非常简单的思想；他不是把一个原子和与之相互作用的辐射场看作两个不同的系统，而是把它们处理为一个系统，该系统的能量是三项之和：一项代表这个原子的能量，第二项代表辐射场的电磁能，还有一个代表原子与辐射场耦合能的小项……

不久继续写道：

一个很简单的例子会解释这些关系。让我们考虑一个单摆，对应于该原子；以及一段在单摆邻近振动的弦，代表辐射场……为得到这一（相互作用）项的力学描述，让我们用一条很细而且有弹性的线将质量为 M 的摆锤捆绑在弦上的一点 A 上……如果弦的周期等于摆的周期，则就会发生共振，一定时间后单摆的振幅会变得很大。这个过程相应于原子吸收辐射的过程。

以谐振子为出发点，每一件事情都从头做起。给出了一些十分精巧的实例，说明这种形式如何在时空中重新产生具体的实验解决办法，除了主导现代教科书的“S-矩阵”型散射过程之外，还包括多普勒（Doppler）效应和李普曼（Lippmann）条纹。

有讽刺意味的是，考虑到将要发生的事情，费米的评述文章没有考虑电子场系统的量子化。涉及正电子的各式各样过程都是做了一些变通，实质上是按狄拉克的空穴理论讨论的。

事后来看似很明显，查德威克（Chadwick）在 1932 年发现中子，标志着核物理学从古代到经典时代的飞跃。（早期的主导观点认为原子核是由质子和紧紧束缚的电子组成的，如今回想起来该观点与似乎有点轻率的奥克姆（Occam）剃刀的应用相一致。当然，这个观点粒子数最节省，但它回避了动力学问题，且它还有量子统计方面的问题—— ^{14}N 将会含有 21 个粒子，是一个费米子，而分子光谱却表明它是玻色子。）然而，当时存在很多混乱。

最严重的困难与 β 衰变有关，它在核领域导致量子力学和能量守恒的正确性问题。表面上看，观测似乎表明了一个过程 $n \rightarrow p + e^-$ ，其中一个中子衰变为一个质子加一个电子。但是这将意味着中子遵从玻色统计，并且它重新提出上面所说的光谱问题。再有，观测表明放出的电子具有不一般的能谱，如果能量和动量都守恒的话，这样的能谱对一个二体衰变来说是不可能的。然而泡利建议，倘若衰变实际上是带有一个没检测到的粒子 $\bar{\nu}$ 的 $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$ ，则量子力学的一般原理就能得到遵从，能量守恒定律就可以保持。

费米为泡利的粒子发明了术语“neutrino（中微子）”。这始于谈话中的一个小笑话，neutrino 是意大利语 neutrone（中子）的昵称，表示一个小的中性粒子和一个重的中性粒子的明显对比。当然，它被保留下来了。（实际上，中子衰变中出现的是我们今天所称的反中微子。）

更重要的是，费米认真地和全部地采纳了泡利的观点，并试图使它与量子力学和狭义相对论相符合。这意味着构建一个合适的量子场论。他已经掌握了量子电动力学的观点和技巧，并在吸收了约当（Jordan）-魏格纳（Wigner）费米子场的量子化技术之后，他准备为 β 衰变构建一个量子场论。他选择了一个包括四个有关场定域耦合的可能的最简单形式哈密顿量，每一种粒子中的一个粒子被产生或被消灭。正如费米所讨论的，存在各种各样可能性将旋量组合为洛伦兹不变量。然后他计算了电子的发射谱，包括不为零的中微子质量的可能效应。

不久以后就变得很明显，这些思想在普遍意义

上成功地处理了关于 β 衰变非常大量的数据。从那以后的 40 年，它们提供了弱相互作用理论的根本基础，并且仍然保持为粒子物理和核物理一个重要篇章的最有用的和可以作为基础的描述。主要的改进包括普适性概念、宇称破坏、V-A 理论——它们一起，在规范原理的基础上，产生了引人注目的向更深刻基础的飞跃——更不用说对中微子本身的实验研究，所有这一切都牢固地基于费米所提供的基础。

五、量子场要素 II:

从定域相互作用到粒子/力（实和虚）

尽管费米关于 β 衰变的工作是典型具体的和重点突出的，他隐含地为量子场论设定了一个非常宽泛的动机。他强调相互作用量子场论的抽象原理和自然界的一个最基本方面，即粒子产生和消灭过程无处不在的直接联系。

定域相互作用需要同一点场算符的乘积。当场都被展开为产生和湮灭算符相乘模式时，我们看到这些相互作用对应于粒子可以产生、湮灭或变成其他种类粒子的过程。当然，这种可能性在最初的量子场论即量子电动力学中就出现了，其中首要的相互作用来自于电子场、它的厄米（Hermite）共轭和光子场的乘积。光子被电子（或正电子）辐射或吸收的过程以及电子-正电子对的产生过程，都包含在这个乘积中。但因为光的放射和吸收是如此常见的过程，而电动力学又是这样一个特别的、熟悉的经典场论，所以形式和现实之间的这种对应最初没给人以深刻的印象。量子场论描述粒子转化过程的潜力的第一次有意识的开发，是费米的 β 衰变理论。他打破了常规，从观测到的粒子变换过程推论出场的基本定域相互作用的性质。费米的理论不仅包括光子的产生和湮灭，也包括作为“物质”的组成部分的原子核和电子（还有中微子）的产生和湮灭。由此，它开创了包含稳定个体粒子的经典原子论被更深奥、更精确的图像代替的过程。在这个图像中，只有场，而不是它们产生或消灭的个体粒子，是永恒的。

这个观点从它与量子场论的第二个普遍推论的联系，即力和相互作用与粒子交换之间的联系增强了能力。当麦克斯韦完成电动力学方程时，他发现它们支持无源的电磁波。经典电场和磁场呈现出它们自己的生命。带电粒子之间的电力和磁力被解释为一个粒子作为电场和磁场的源，然后这些场影响

其他粒子。依据如量子场论中所呈现的场和粒子的对应，麦克斯韦的发现对应于光子的存在，力凭借媒介场产生对应于虚光子的交换。

力（或更一般地，相互作用）与粒子之间的联系是量子场论的普遍特征。“实”粒子是场的激发，能够被有效地视为独立实体，典型地是因为它们具有适当的寿命，并可同其他激发在空间上分开单独存在，使得我们可以将它们与确定单位的质量、能量、电荷的输送联系起来。但在量子场论中所有的激发也都可以作为短寿命的涨落而产生。这些涨落在我们所认为的真空中不断发生，因此物理学家关于真空的观念，远远不是简单的什么都没有。实粒子的行为会受到它们与这些虚涨落相互作用的影响。根据量子场论，确实如此。所以观测到的力应该归因于量子场的涨落——但这些场也支持真正的激发即实粒子。实实在在的粒子和它们的“虚”的同胞就如同一个硬币的两面一样不可分离。这种联系被汤川（Yukawa）用来根据核力的力程而推出 π 介子的存在和它的质量。（汤川是从考虑是否交换虚的、费米的 β 衰变理论中的电子和中微子作为核力的原因开始他的工作的！在证明了这些虚粒子给出的力实在太小以后，才导致他引入了一种新的粒子。）最近它又被用来在弱相互作用中在观测之前推论出 W 和 Z 玻色子的存在以及其质量和性质，在 QCD 中用来在观测之前推出胶子喷注的存在和特性。

这一系列的相关的思想，对我来讲成为了 20 世纪物理学至高无上的光荣，都是围绕着费米的 β 衰变理论成长起来的。我的标题《费米及物质的解释》有两层含义。因为费米最出色的洞察力，精确地讲，就是认识到了物质和光的深刻的共性。

六、核化学

具有与 β 衰变非常不同特性的另一大类核嬗变，是那些不包含任何轻子的过程。用现代语言来说，这些是靠强相互作用和电磁相互作用来传递的过程。它们包括重核的碎裂（裂变）和轻核的结合（聚变）。这些过程有时被称为核化学，因为它们可被描述为现有的一些成分——质子和中子——的重新排列，这与普通化学可被描述为电子和原子核的重新排列的方式相同。用这种术语，把 β 衰变称为核炼金术会很自然的。

费米领先于其他所有人发现了开发核化学实验研究的技术。这就是慢中子进入并激发核靶的巨大

能力。费米认为这是他的最重大的发现。在一次与 S·查德瑞斯克哈（Chandrasekhar）的会见中，他这样描述它：

我将告诉你，我是怎样做出我认为是我所有的发现中最重要的这个发现的。当时我们正在非常辛苦地研究中子诱导的放射性，而我们正在得到的一些结果却毫无意义。一天，当我到了实验室时，我忽然想到我应该考察一下将一块铅置于入射中子前面的效果。与我的通常习惯不同，我费了很大力气将这块铅精细地加工好。显然有一些事让我不满意：我试了各种各样的借口拖延把铅块放到它位置上，当最后，有点勉强地要把铅块放上时，我自言自语道：“不，这里我不要一块铅，我需要一块石蜡。”就像这样，没有事先的预兆，没有任何有意识的事前推理。我立刻拿了一些零碎石蜡块把它放到曾准备放铅块的地方。

关于他如何以超乎寻常的喜悦和干劲鼓动在罗马他的小组，运用他的这个无意中的发现，有过一些精彩的描述。

这里我将不去重述这个故事，也不重提以原子弹工程开始的核技术史诗般的传奇故事。我们仍然在屈服于核武器的毁灭性潜力，而且只不过刚刚开始利用核能资源。

从纯物理的观点看，费米在核化学方面工作的意义是首先表明原子核可以有效地被描写为复合体，在其中尽管质子和中子紧密接触，但却保持它们的个体性和其他一些性质。这个观点在梅耶（Mayer）和詹森（Jensen）的壳模型中发挥极致。非常著名的，费米曾帮助启发了梅耶的工作，特别是，建议了自旋-轨道耦合的重要性，这被证明很关键。梅耶描述相互作用很强的量子系统的独立粒子模型的成功，激发了关于多体问题的深入的工作。它也为夸克模型提供了知识背景。

七、最后的洞察和想象

随着核化学的发展清楚表明不同的原子核是由质子和中子构成的，而 β 衰变理论的发展证明质子和中子可以相互转化，我们的问题 2，即理解世界的组成，成为明显的焦点。具体地，把元素的起源作为一个科学问题提出成为了可能。费米对于他的工作所开创的这种可能性非常关注。他同特克韦奇（Turkevich）一起，对伽莫（Gamow）的“伊伦”（译者注：伊伦为宇宙演化论中所假设的最原始物

质) 建议进行了广泛的讨论, 该建议认为元素是从处于一个热的、急剧膨胀宇宙中仅有的中子开始, 通过连续的中子俘获而形成的。他们正确地确认了这个观点的主要困难, 即在原子序数 5 处的不可逾越的空缺, 那里没有合适的稳定原子核存在。然而几乎就是沿这些路线, 可构建一个丰富而详尽的元素起源的描述。在 $A=5$ 处的费米-特克韦奇空缺反映在了观测丰度中, 其中少于 1% 的宇宙化学属于这样的原子核, 它是天文学家的“金属”。超越 $A=5$ 的那些元素 (除了很小量的 ${}^7\text{Li}$ 以外) 均以不同的方式在给行星提供能量的那些反应中产生, 在超新星爆发时, 通过风或许最后的加热, 重新被注入回循环之中。大爆炸核合成的正确的初始条件也假定了高温下的热平衡, 并非都是中子。尽管他没有最终走到那一步, 费米预想到了这块宝地。

在观测、整理、甚至控制核过程方面的所有这些进展主要都基于实验工作。用来使实验资料相互关联的那些模型综合了相对论运动学和量子力学基本原理, 而不是从一整套基本方程导出的, 实验研究表明低能时原子核之间的相互作用极为复杂。它以完全纠缠的方式依赖于距离、速度和自旋。可以用一套依赖于能量的函数——“相移”——将实验结果参数化, 但这些函数没显示出明显的简单性。

高能理论独树一帜的胜利是汤川 π 介子的发现。这个粒子, 连同汤川理论假设的简单定域耦合, 可以半定量地解释核力的长距离尾巴。它会提供全部答案吗? 没有人能肯定告诉你, 必要的计算太难了。

从 1950 年左右开始, 费米关注的主要焦点是 π 介子-核子相互作用的实验研究。可以说, 它们可能仅仅在解释上有一点点困难, 因为它们已接近汤川秀树理论的核心元素。但 π 介子-核子相互作用也被证明极为复杂。

随着观测现象复杂性的增长, 费米开始怀疑汤川理论的适用性。没有人能够精确地计算出该理论的结果, 但是观测现象的不断丰富逐渐削弱了假设用类点的质子、中子和 π 介子可以达到强相互作用物质最深层理解的基础。存在一些导致怀疑的更深刻的原因, 它们来自于对问题 2 的相当满意的考虑。 μ 子的发现, 是宇宙射线事件中有更多新粒子 (最后演化到我们的 K 介子) 的征兆, 它与熟悉的核子、电子、光子、加上中微子和 π 介子一起, 显示了“基本”粒子的迅速扩张。它们彼此之间都以

复杂的方式相互转化。能否应用量子场论具有的转换能力的特点, 为这个扩张分离出一种简单的基本成分——很少的、真正更基本的构件呢?

在他后来的一件理论工作中, 与杨振宁一起, 费米提出了汤川理论一个非常好的替代理论, 它会使粒子开始减少一些。他们建议, π 介子根本不是基础和基本的, 而是一个复合粒子, 具体地讲, 是一个核子-反核子束缚态。这是继核的壳模型之后的思想的重要的外推。此外, 他们提出, 基本的强相互作用就是我们今天所称的核子场的四费米子耦合。 π 介子是作为这种相互作用的结果产生出来的, 而汤川理论作为一种近似——是我们今天所称的一种有效场论。费米-杨理论中的这种基本相互作用, 与费米的 β 衰变理论中出现的相互作用具有相同形式, 尽管当然相互作用强度以及所包含的场的特性是完全不同的。在杨振宁对这个工作的详细描述中, 他说到:

正如在这篇文章中清楚地阐述的, 我们确实没有对我们所建议的东西会实际上对应着真实的实际抱有任何幻想。……然而, 费米说过, 学生求解问题; 而科研工作者提出问题……

确实, 他们建议的细节并不对应于我们的现代理解。特别是, 我们已经学会适应粒子的迅速增加, 只要它们的场由对称性关联起来。但是费米和杨所提出的那些问题中的一些——或者, 我认为, 他们隐含地启示的一些方向——回顾起来, 都是富有成效的。首先, 整篇论文牢固地置于相对论量子场论的框架内。它的目标是, 本着量子电动力学和费米 β 衰变理论的精神, 探索这个框架的可能性, 而不是推倒它。例如, 当时反核子的存在还没有被实验证实。然而, 反粒子的存在是相对论量子场论一个普遍推论, 因而鲜有批评地被接受了。第二, 以重得多的组分构建轻粒子是创新性的观念。它是通过结合能使质量降低的一种极端外推。今天我们沿着这同一路线走得更远, 把无限重 (禁闭) 的夸克和胶子束缚为观测到的强相互作用粒子, 包括 π 介子和核子。第三, 也是最深刻的, 强相互作用和弱相互作用, 尽管具有非常不同的表现特征, 但在其基本机制上深刻相似的可能性被预料到了。这样一种众所周知的机制的存在, 它源于后来由费米的合作者发现的概念——杨-米尔斯 (Mills) 理论, 正是称之为标准模型的现代物质理论的一个核心特征。

在他的另一件最后的工作中，与帕斯塔 (Pasta) 和乌拉姆 (Ulam) 一起，费米热情地抓住一个探索的新机遇——正在形成的快速的机算能力。以他对未知的和可达到的边界的直觉，他选择重新处理一个曾是他最早论文之一的主题的、经典的、基本问题，即在多体系统中趋近平衡态的问题。统计力学标准的有效假设是，平衡态是默认选择，在任何复杂系统中都会很快达到，除非一些简单的守恒定律禁止它。但它的证明是出了名的难懂。费米想通过一些可以控制的数值实验来探索这种情形，在那里复杂程度可以变化。具体地，他把各种适当数目的定域耦合的非线性弹簧耦合在一起。一件令人难以置信的、惊奇的事情出现了：趋向平衡态的路径远非平凡，存在一些新出现的结构，可以无限期保持的集体激发。在这个工作中预示了孤子的话题，后来被证明是广泛存在的而且硕果累累。然而随之出现了一个深奥但有些含糊不清的问题，它对充分理解自然界起核心作用，这就是一些有序结构是怎样从简单的均匀规律和最小结构的初始条件发生的。

并非巧合地是，同样的数学结构——定域耦合的非线性振子——在相对论量子场论中处于基础地位。确实，如我们所见，这正是费米从一开始到达这个课题的方式。在现代 QCD 中，这些新的结构是质子、 π 介子和其他强子，它们很好地隐藏于夸克场和胶子场的“弦”中。费米所开创的那种数值工作仍然是我们研究这类结构的最可靠的工具。

显然，费米正在把物理学引向生机勃勃的新方向。他的突然辞世，对我们这个领域是莫大的损失。

八、费米作为启示：激情和风格

纵览费米的整体成就，会感受到一种特殊的激情和风格，在现代物理中独一无二。显然，费米热爱与自然界的对话。他或者可以如我们刚讨论过的那些求索过程中用他自己的质疑方式，或者像他在核嬗变及 π 介子物理的近乎苛刻地系统的实验研究中以耐心收集事实的方式，回应自然界最深刻的奥秘。但是，正如这本书收集的许多费米的故事所证明的，在解决或者只不过解释了自然界一些比较简单的难解之谜时，他也会非常高兴。

费米解决了知识前沿的一些野心勃勃的问题，但却总是那么现实和谦虚。他的科学风格的这些方

面，流露在他去世前不久写就的珍贵的“方法论”见解之一中：

当汤川理论最早提出时，存在着一种合情合理的希望，即所包含的那些粒子，诸如质子、中子以及 π 介子都可以合理地被认为是基本粒子。但随着新的基本粒子被快速地发现，这个希望越来越失去了它的基础。

很难说未来的路将会是什么。人们可以回到这本关于方法的书（我怀疑许多物理学家是否会真的这样做），在其中将会学到必须获得实验数据、搜集实验数据、组织实验数据、开始做一些有效假设、力图把它们关联起来，如此等等，直到一个模式终于涌现，那时人们只须挑选出结果。也许在没有任何更好的情况下，教科书中传统的科学方法是最好的指导……

当然，也许不久有人会得出介子问题的一种解，并且实验结果会证实理论如此多的细节特征，以至于对每人来说它显然都是正确的。这种事过去曾经发生过。它们可能会再次发生。但我不相信我们可以指望它，我相信我们必须准备好做长期的、艰苦的努力。

你们当中熟悉强相互作用问题后来的历史的那些人，会认识到费米的预测令人惊异地精确。长期的实验探索和模式识别为伟大的知识飞跃与综合提供了先决条件。我想，这个过程会使费米满意，而不会让他惊奇。

物理学目前的情况完全不同于费米所经历过的或最后所描述的。在 20 世纪的辉煌胜利之后，雄心勃勃是很容易的。关于基本动力学定律的终结和所观测宇宙的起源这些根本性的问题开始显得可以理解了。量子工程的潜力以及理解如何能把已知的基本东西和谐地安排到复杂的系统中去，包括强有力的思维能力的挑战在召唤。保持现实态度和（因此而）适当的谦虚——换句话说，在与自然界对话中，精心制作我们可以肯定回答的一些重要的子问题，并不是太容易。在这种艺术中，费米是一位天赋的大师和伽利略的当之无愧的继承者。

（丁亦兵、乔从丰、任德龙，中国科学院研究生院 100049；李学潜，南开大学物理学院 300071；沈彭年，中国科学院高能物理所 100049）